3-3 東北地方の地殻変動 Crustal Movements in the Tohoku District

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

[水準測量 新発田市~酒田市]

第1図は,新潟県新発田市から秋田県酒田市に至る南北の路線の水準測量結果である.最上 段のグラフについては,今回の観測が2015年8~9月,前回の観測は2002年であり,東北地 方太平洋沖地震の地震時変動と余効変動を含んでいる. 鶴岡市北部から酒田市にかけて沈降が 見られる.

[GNSS 地震後の変動ベクトルおよび等変動量線図]

第2~6図は、東北地方太平洋沖地震後の期間における水平・上下の地殻変動について、全期間の累積及び最近3ヶ月間の変動を、福江観測点を固定局として示したものである。第2~4図に示す地震後の累積の図には、2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2,最大震度6強,深さ約66km, 逆断層・スラブ内地震,地殻変動GNSSで水平約3 cm西南西と約5 cmの隆起)、2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0,最大震度6弱,深さ約6 km,正断層,地殻変動GNSSで約30 cm水平と約50 cmの沈降,SARで約2 m)、2011年4月12日長野県北部の地震(M5.6,最大震度5 弱,深さ約0 km,横ずれ、地殻変動北東へ約2.6 cm)、2011年4月12日千葉県東方沖の地震(M6.4,最大震度5 弱,深さ約26 km,右横ずれ,地殻変動約1 cm)、2011年6月23日岩手県沖の地震(M6.9,最大震度5 弱,地殻変動東方向に約1.5 cm)、2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3,深さ34 km,最大震度4,地殻変動西方向に約5 mm,左横ずれ)、2011年9月17日岩手県沖の地震(M6.6,最大震度4,地殻変動西方向に約5 mm,左横ずれ)、2011年9月17日岩手県沖の地震(M6.6,最大震度4,地殻変動西方向に約5 mm,左横ずれ)、2011年9月17日岩手県沖の地震(M6.6,最大震度4,地殻変動西方向に約5 mm,左横ずれ)、2011年9月17日岩手県沖の地震(M6.6,最大震度4,地殻変動西方向に約5 mm,左横ずれ)、2011年9月17日岩手県沖の地震(M6.6,最大震度4,地殻変動西方向に約5 mm)等の影響が震源近傍の観測点で見られる。

第2図は地震後の全期間における水平変動の累積を示す.東日本全体で東北地方太平洋沖地震の震源域に向かう余効変動が観測されている.最大の変動量は,岩手川崎A観測点における約130 cm である.

第3回及び第4回は、地震後の全期間における上下変動の累積を、それぞれ、変動ベクトル図及 び等値線図で示したものである。岩手県三陸沿岸と奥羽脊梁山脈付近で沈降が見られる一方、宮城 県から千葉県の太平洋沿岸では隆起傾向が見られる。M 牡鹿観測点の約46 cm の隆起のうちの約 5 cm は、2011年4月7日の宮城県沖の地震によるものである。

第5図の最近3ヶ月間の水平ベクトルには,東日本全体で東北地方太平洋沖地震の震源域に向かう変動が見られ,余効変動が継続していることがわかる.この期間における岩手川崎A観測点の 変動量は2.2 cm となっている.

第6図に最近3ヶ月間の上下変動を示す. 牡鹿半島周辺にわずかな隆起が見られるが, その他の 地域では上下変動は小さくなってきており, 3ヶ月間の変動ではノイズとの見分けがつきにくくな っている.

[GNSS 連続観測 地震前後]

第7~12図は、東北地方太平洋沖地震後の東日本における GNSS 連続観測時系列である。第7

図に示した太平洋岸の観測点 10 点と,その西側の観測点 10 点の合計 20 観測点について,第8 図 以降に東北地方太平洋沖地震後の期間の時系列を示す.各成分の縦軸は,本震直前の値をゼロとし ており,地震時及び地震後の累積の変動量を表している.そのため,沈降した地盤が地震前の高さ に戻るかどうかは,上下成分がゼロに回復するかどうかで判断できる.

第8~12図の各観測点の時系列では、東北地方太平洋沖地震の余効変動が減衰しながらも継続 している様子が見られる.また、第7図に示した各地震の影響が、震源近傍の観測点で見られる.

第8~10図上段に示す太平洋岸の10観測点では、(2)岩泉2観測点と(3)山田観測点を除き、 地震直後から隆起が継続している.なお、岩泉観測点及び山田観測点についても、2013年以降は それまでの沈降傾向が反転し、隆起となっている。

第10図下段から第12図の西側の観測点10点では、地震直後からの沈降、または隆起が減衰し ながらも継続している。

[GNSS 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動速度]

第13~18 図は、三隅観測点に対する宮古、山田、矢本、相馬1、銚子、皆瀬観測点の変位 と変動速度を時系列で示したものである。どの観測点についても、水平変動速度は徐々に減衰 しつつあるが、地震前のレベルには戻っておらず、余効変動が継続していることがわかる。上 下変動速度は、銚子観測点については元の速度に戻りつつあるが、その他の宮古、山田、矢本、 相馬1 観測点については隆起傾向、皆瀬観測点は沈降傾向が続いている。なお、第13 図の三隅 - 宮古基線および第14 図の三隅 - 山田基線の東西成分の速度に 2015 年初頭に見られる一時的 な変化は、2015 年 2 月 17 日に発生した三陸沖の地震及び 2015 年 5 月 13 日に発生した宮城県沖 の地震によるものである。また、第18 図に示される三隅 - 皆瀬基線の変化のうち、南北成分の 速度に 2011 年秋及び 2014 年初頭に見られる一時的な変化は、2011 年 10 月下旬頃から 11 月上 旬頃までの期間及び 2014 年上旬頃に発生したスロースリップイベント (SSE) に伴う地殻変動 の影響、東西成分速度の 2012 年 3 月頃に見られる一時的な変化は、2012 年 3 月 14 日に発生し た千葉県東方沖の地震(M6.1) によるものである。

[GNSS 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験]

第19~27 図は、東北地方太平洋沖地震の余効変動の予測実験に関する資料である。GEONET のF3 解による地殻変動3成分(東西,南北,上下)の時系列データに対して関数近似を行い,こ れを外挿することで,余効変動の予測を試みる取り組みで,前回から時定数の異なる対数関数と指 数関数を組み合わせた混合モデルによる近似結果と予測結果を報告している.ただし、こうした余 効変動の予測は非常に困難で、かつ研究初期段階にあり、その手法は確立していない.

地震後の上下変動の推移が異なる各地域を代表する4つの観測点,宮城県の「矢本」(隆起の後, 隆起),千葉県の「銚子」(隆起の後,停滞),岩手県の「宮古」(沈降の後,隆起),秋田県の「皆瀬」 (沈降の後,沈降)について,それぞれ地震後2年間のデータによる関数フィッティングの結果と, その後現在までの(約4.85年間の)予測能力の評価を示した後,それぞれ地震後20年間の余効変 動予測結果を示した.

今回はモデル(2)(ダブル対数・指数モデル)の資料を掲載している.第20~23 図は,地震後2年間の近似期間による予測(赤)と地震後4.9年間の観測値(灰色)の比較を示している.図からわかるように,地殻変動は,おおむね予測の範囲内で進行しており,モデル(2)の予測能力が

良好であると同時に,顕著なずれは見られないことが確認できる.なお,各図の下に掲載している 関数近似結果および予測部分の標準偏差は,モデル(2)全体(4 観測点同時・3 成分同時推定)で の値である.

第24~27 図は,モデル(2)に基づく地震後20年間の余効変動の予測である。今回は,直近まで(地震後4.85年まで)のデータを用いた予測に加え,地震後2年間のデータを用いた予測を併せて示している。用いたデータ期間によって,定量的には西向きへの反転時期や地震時沈降回復時期に関する予測結果が異なっている。

長期的な変動速度は定常速度に近づくことになるため、定常速度は余効変動予測において重要で ある.しかし残念ながら、関数近似の際の非線形最小二乗推定において定常速度を推定パラメータ に含めると、グローバル解を安定的に得ることが難しい.そのため、ここではグローバル解を得る ために、定常速度は推定せず、1997年4月から2000年3月の各観測点の平均速度と同じであると 仮定し与えている。今後、余効変動の実データによる検証を行うことによって、これらの余効変動 予測モデルの実力がわかると同時に、定常速度が地震サイクルの中で一定であるかどうかがわかる 可能性がある.

新発田市~酒田市間の上下変動

<u>鶴岡市北部から酒田市にかけて沈降が見られる.</u>



第1図 新発田市 ~ 酒田市間の上下変動













Fig.3 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical).



第4図 2011年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動(上下,コンター)

Fig.4 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical, contour).











平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(時系列) 配点図

各観測局情報

点番号	点 名	日付	保守内容	۱ I	点番号	点 名	日付	保守内容
950101	八戸	2012/09/25	アンテナ更新	[950155	大鰐	2012/10/02	アンテナ更新
950164	岩泉2	2012/02/09	アンテナ更新	[960553	田沢湖	2012/09/14	アンテナ更新
950167	山田	2012/02/04	アンテナ更新	[950166	矢巾	2012/01/26	アンテナ更新
051145	岩手川崎A	2012/01/25	アンテナ更新		940031	本荘	2012/02/04	アンテナ更新
960549	矢本	2011/12/16	アンテナ更新	[950193	皆瀬	2012/03/10	アンテナ更新
940038	相馬1	2012/01/12	アンテナ更新	[071162	新潟山北	2012/09/05	アンテナ更新
		2014/11/20	受信機交換	[940035	天童	2012/08/21	アンテナ更新
940041	いわき	2011/12/13	アンテナ更新	[950202	猪苗代1	2012/01/13	アンテナ更新
		2013/12/05	レドーム開閉		950218	日光	2012/11/13	アンテナ更新
93004	鉾田	2012/02/16	アンテナ更新	[93016	足立	2012/12/11	アンテナ更新
93022	銚子	2012/02/21	アンテナ更新				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
950462	福江	2012/11/07	アンテナ更新					

第7図 東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動(時系列)配点図

Fig.7 Time series of crustal deformation before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Site location map).

成分変化グラフ









ארי 2015 ארי 2016 ארי אוואס 2011/03/12~2016/04/23 JST

> 420 400

福江 (950462) →岩手川崎A (051145) 東西

.cm (4) 福江(950462)→岩手川崎A(051145) 南北

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST

5/23 W6 9 11/00/17 W6 6

2) 福江(950462)→岩泉2(950164) 東西

基準值:1162273.358r

基準值:1122466.232

基準值:691229.790;

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST

201	1204/07 1	17 2						-	-	_	1	_
íΠ	2011/05/	23 M6.	9	_	_	1		T			1	
11		-	1					1			T	
· · · ·							 	1			1	
	1						 				+	
1	2011	/69/17	W 8				 	+				
. Ľ.		T										







7/1 2012/1/1 7/1 2013/1/1 7/1 2014/1/1 7/1 2015/1/1

● ----[F3:最終解] ● ----[R3:速報解] ※グラフの縦軸は2011/03/10の値を0cmとした.

第8図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

Fig.8 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(2)

成分変化グラフ

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST























● ----[F3:最終解] ● ----[R3:速報解]

※グラフの縦軸は2011/03/10の値を0cmとした.

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST

第9図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

Fig.9 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (2/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(3)

成分変化グラフ

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST

(10) 福江(950462)→魏子(93022) 東西









基準值:1103481.292#

基準值:1067584.903r

基準值:779986.673m



2011204	/12 WE 4						
°		معد		÷.	de la	den.	 10.0
		1.00		10			11.1
1	↑						
•	2012/	Q3/14 M6.	1				

) 福江(950462)→田沢湖(960553) 東西

cm (12) 福江(950462)→田沢湖(960553) 南北

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST

[1]:	2011	/03/	12~2	2016	/04/	23 J:	ST							
<u>m (</u>)	11) 福	II (95	0462) -	→大堂	iji (950	155)	東西					基準値	E : 104	8218. 457r
"Г														
80														
70														_
					-	_	-		-					
~		-	_	T										
50		· · · · ·												
40														
20 L														
30	7/1	2012	/1/1	7/1	2013	/1/1	7/1	2014	/1/1	7/	1 2011	5/1/1	7/1	2016/1/1







7/1 2012/1/1 7/1 2013/1/1 7/1 2014/1/1 7/1 2015/1/1 7/1 2016

● ----[F3:最終解] ● ----[R3:速報解] ※グラフの縦軸は2011/03/10の値を0cmとした.

第10図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

Fig.10 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (3/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(4)

成分変化グラフ

基準值:1107622.218m

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST

期間: 2011/03/12~2016/04/23 JST cm (13) 福江(950462)→矢巾(950166) 東西













cm (14) 福江(950462)→本荘(940031) 東西 (14) 福江(950462)→本荘(940031) 南北 **鉄進信: 746295.090**

基準值:1008256.046r







● ----[F3: 最終解] ● ----[R3: 速報解] ※グラフの縦軸は2011/03/10の値を0cmとした.

第11図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

Fig.11 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (4/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(5)



成分変化グラフ

第12図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

Fig.12 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (5/5).



第13図 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (宮古観測点・時系列)

Fig.13 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Miyako site) (1/6).



- 第14図 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (山田観測点・時系列)
- Fig.14 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Yamada site) (2/6).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動 <u> ま北地方太平洋沖地震前後の地殻変動</u> 2015年5月13日に発生した宮城県沖の地震に伴う地積安朝の建築灯見られる。 三隅(950388) -- 矢本(960549) 間の成分変位と速度グラフ





Fig.15 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Yamoto site) (3/6).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動 <u>東北地方太平洋沖地震発生前の変動速度には戻っていない</u>

三隅 (950388) -- 相馬1 (940038) 間の成分変位と速度グラフ



- 第16図 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (相馬1観測点・時系列)
- Fig.16 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Souma 1 site) (4/6).



第17図 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (銚子観測点・時系列)

Fig.17 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Choshi site) (5/6).



- 第18図 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点における地殻変動速度の変化 (皆瀬観測点・時系列)
- Fig.18 Crustal movement velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area (Time series at Minase site) (6/6).

	モデルタ	モデルオ	資料ページ				
			予測値と観測値の比較	20 年予測			
1	対数 + 指数混合	$D(t) = a \ln\left(1 + \frac{t}{b}\right) + c - d \exp\left(-\frac{t}{e}\right) + V t$	_	_			
2	ダブル対数 + 指数	$D(t) = a \ln\left(1 + \frac{t}{b}\right) + c + d \ln\left(1 + \frac{t}{e}\right) - f \exp\left(-\frac{t}{g}\right) + Vt$	pp.90-91	pp.92-93			
3	対数 + ダブル指数	$D(t) = a \ln\left(1 + \frac{t}{b}\right) + c - d \exp\left(-\frac{t}{e}\right) - f \exp\left(-\frac{t}{g}\right) + Vt$	_	_			

モデル一覧

観測点一覧



(1) 矢本(960549) (2) 銚子(93022) (3) 宮古(940028) (4) 皆瀬(950193)

第19図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験(説明)

Fig.19 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (explanation).

東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験(9) モデル2

近似期間 2011/03/12-2013/03/11(731日) 最終データ 2016/01/16[F3解] 福江(950462)-矢本(960549) 4観測点同時・3成分同時推定 ダブル対数+指数モデル

ダブル対数+指数関数モデルによる2年間のデータに基づく予測は依然良好。



第20図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

Fig.20 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1/8).

東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験(10)

モデル2

近似期間 2011/03/12-2013/03/11(731日) 最終データ 2016/01/16【F3解】 福江(950462)-銚子(93022) 4観測点同時・3成分同時推定 ダブル対数+指数モデル





・定常速度1/は、1997/4/1-2000/3/31観測値の近似直線の傾きの値で固定。

第21図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

Fig.21 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (2/8).

東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験(11) モデル2

近似期間 2011/03/12-2013/03/11(731日) 最終データ 2016/01/16[F3解] 福江(950462)-宮古(940028) 4観測点同時・3成分同時推定 ダブル対数+指数モデル

予測は依然良好。短期的な沈降と指数による長期的隆起で説明。



第22図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

Fig.22 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (3/8).

東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験(12)

モデル2

近似期間 2011/03/12-2013/03/11(731日) 最終データ 2016/01/16【F3解】 福江(950462)-皆瀬(950193) 4観測点同時・3成分同時推定 ダブル対数+指数モデル





・時定数b,e,gをわぞれ、4戦別点・3成分(す西・南北・上下) 大通として推定。
 ・定常速度Vは、1997/4/1-2000/3/31観測値の近似直線の傾きの値で固定。

第23図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

Fig.23 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (4/8).



 [・]ダブル対数+指数モデル式 D(t) = a ln(1+t/b) + c + d ln(1+t/e) - f exp(-t/g) + Vt
 ・時定数b, e, gをそれぞれ、4観測点・3成分(東西・南北・上下)共通として推定。
 ・定常速度V(は、1997/4/1-2000/3/31観測値の近似直線の傾きの値で固定。

第24図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

Fig.24 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (5/8).



モデル2

近似期間 2011/03/12-2016/01/16(1772日) 最終データ 2016/01/16【F3解】20年予測 福江(950462)-銚子(93022) 4観測点同時・3成分同時推定 ダブル対数+指数モデル



・ダブル対数+指数モデル式 D(t) = a ln(1+t/b) + c + d ln(1+t/e) - f exp(-t/g) + Vt
 ・時定数b, e.gをそれぞれ、4観測点・3成分(東西・南北・上下)共通として推定。
 ・定常速度Vは、1997/4/1-2000/3/31観測値の近似直線の傾きの値で固定。

第25図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

Fig.25 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (6/8).



2013 2015 2017 2019 2021 2023 2025 2027 2029

2031

2029 2031

対数時定数e

119.0 日

• ud

udc

u_log1

u log2

u exp

u_v

uc2y

指数時定数q

450000 日

東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験(16)

近似期間 2011/03/12-2016/01/16(1772日) 最終データ 2016/01/16【F3解】 20年予測 福江(950462)-皆瀬(950193) 4観測点同時・3成分同時推定 ダブル対数+指数モデル

モデル2

近似期間により西向きへの反転時期が異なる。沈降速度は速め。





2017 2019

AIC

-222015

第26図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

2013 2015

標準偏差

5.20 mm

0.1

-0.1

-0.4

-0.5

-0.6 -0.7

関数近似

結果

上下-0.2 成-0.3

0

Fig.26 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (7/8).

2021 2023 2025 2027

対数時定数b

1.65 日

・ダブル対数+指数モデル式 $D(t) = a \ln(1+t/b) + c + d \ln(1+t/e) - f \exp(-t/g) + Vt$ ・時定数6.*e.g*をそれぞれ、4観測点・3成分(東西・南北・上下)大通として推定。 ・定常速度Vは、1997/4/1-2000/3/31観測値の近似直線の傾きの値で固定。

第27図 東北地方太平洋沖地震余効変動の予測実験

Fig.27 Speculative experiments on postseismic deformation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (8/8).